第五章 運動理論與萬有引力

5.1 阿里士多德的力學

- **自然萬物由四種元素造成，包括地、水、風和火。**
- **地心模型 (Geocentric model)：地球是宇宙的中心。**
- **自然運動 (Natural motion)：物體按自己的特性，走向適當的地方。例如地與水會走向宇宙的中心 (即地球中心，此模型試圖解釋重力現象)，火與風會走向天空。這種自然運動以勻速 (在運動中速度保持不變) 進行，越重的物體墜落得越快。**
- **強迫運動 (Violent motion)：物體受外力時移離其適當的地方。**
- **除非受外力作用，否則當物體抵達適當的地方時，運動就會自動停止。**

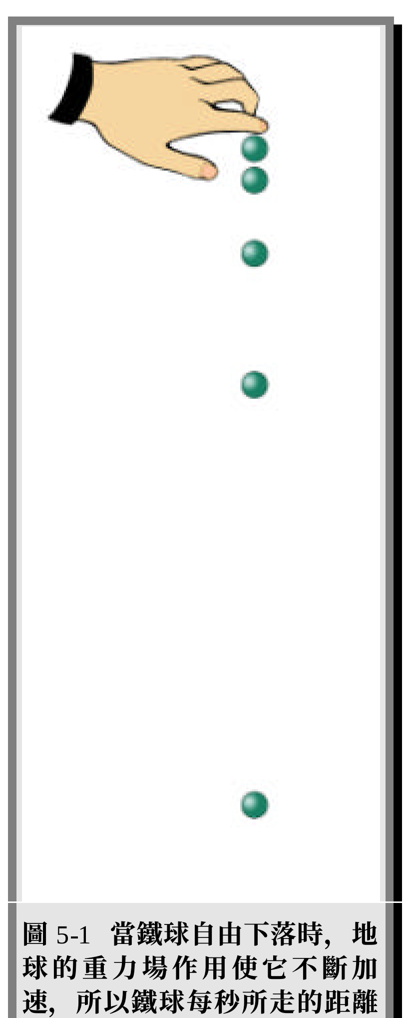


圖 5-1 當鐵球自由下落時，地球的重力場作用使它不斷加速，所以鐵球每秒所走的距離不斷增加。

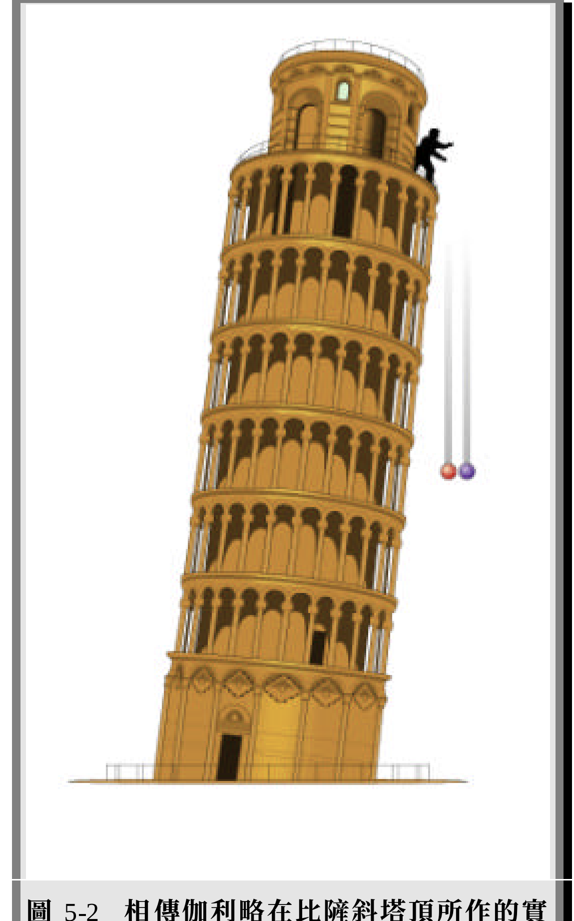


圖 5-2 相傳伽利略在比薩斜塔頂所作的實驗。他在比薩斜塔頂同時釋放木球與鐵球，發現兩者幾乎同步下落，證明物體自由下落的加速度與質量無關。事實上，由於空氣阻力的影響，這並不是一個決定性的實驗。

5.2 伽利略的發現

- 摒棄古學說的權威性，從具體的實驗中證明阿里士多德的理論是錯誤的。
- 物體受地心吸力影響，下跌時會加速 (accelerate)，即速度隨著時間增加，物體越跌越快 (圖 5-1)
- 物體下落時的加速度與它的質量無關，因此重的物體與輕的物體應以相同的速度下跌。
  - 傳說伽利略在比薩斜塔頂同時釋放木球與鐵球，發現兩者幾乎同時落地 (圖 5-2)
  - 在日常生活中，我們不易察覺這個事實。我們總是以為重的物體會跌得較快，例如在地面上，我們發現一把斧頭下跌得遠比一根羽毛快；其實這完全是由於空氣阻力的影響。在真空中，斧頭與羽毛以同樣的速度下跌
- 沒有外力的作用時，物體會以不變的速度運動，即勻速運動 (Uniform motion)。
  - 物體運動時不會無緣無故地自己停下來，唯有當它受外力作用時，才會逐漸減速 (decelerate) 以至停止。例如一塊木頭在桌面上滑動時，木頭與桌面之間的摩擦力會使它慢下來，直至靜止；但如果桌面非常光滑，摩擦力很小時，木頭便會繼續以勻速運動

5.3 牛頓力學

- 牛頓運動定律 (Newton's laws of motion)
- 牛頓第一定律 (慣性定律) (Law of inertia)：除非受外力作用，否則物體會永遠保持其靜止狀態，或在直線上作勻速運動。
  - 伽利略發現的運動原理
  - 物體有維持自己運動狀態不變的傾向，稱為慣性 (Inertia) – 即所謂「靜者恆靜、動者恆動」
  - 在日常生活中，我們不易察覺這個事實。這主要是由於摩擦力或空氣阻力的影響，使運動中的物體看起來好像無緣無故地停下來。我們可以想像在沒有外力作用的太空中，物體以勻速不斷運動 (圖 5-3)

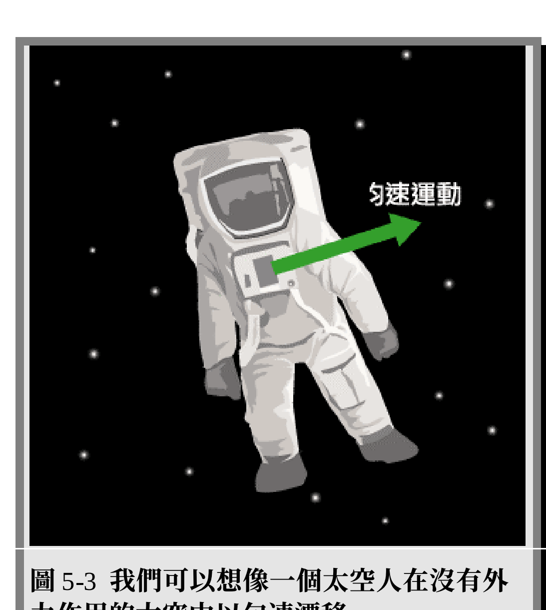


圖 5-3 我們可以想像一個太空人在沒有外力作用的太空中以勻速漂移。

- 牛頓第二定律 (力、質量與加速度的關係) ($F = ma$)：當作用在物體的外力總和 F 不等於零時，物體的運動速度便會改變，稱為加速。加速度 a 的大小與物體的質量 m 成反比，但與物體所受的力大小成正比。加速度與力的方向相同。
  - 物體所受的外力越大，加速度也越大 (圖 5-4)
  - 加速大質量 (較重) 的物體較難 (需要較大的力才可以達到一定的加速度)

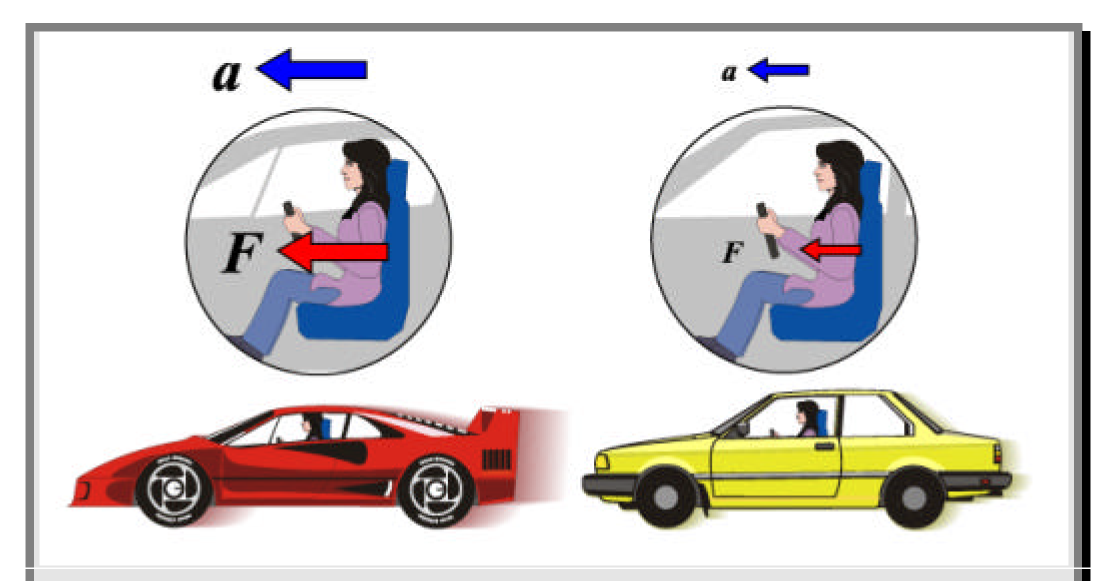


圖 5-4 試想像一輛跑車和一輛房車在公路上加速。公路有車速限制，因此跑車和房車的最終速度相同。但跑車比房車能在更短的時間內達至這個速度，所以我們說跑車的加速度 *a* 比房車的大。在加速時，跑車的司機感受到一個較大的力，把她向前推，正如牛頓第二定律所說，較大的力會產生較加速度。

- 牛頓第三定律 (作用與反作用力定律)：力總是成雙成對地出現。每一個力的出現，必會伴隨著另一個大小相等、方向相反的力 (圖 5-5, 6)。
  - 這對力稱為作用與反作用力對 (action and reaction pair)
  - 作用與反作用力總是分別地作用在不同的物體之上。例如當你推一塊木頭時，你施力於木頭，與此同時，木頭必然以一大小相等、方向相反的力加於你的手



圖 5-5 牛頓第三定律的示例。當圖中的人拉著牆壁時，牆壁便會產生一反作用力於這個人上。注意作用力與反作用力的大小永遠相等，但兩者卻作用在不同的物體上。

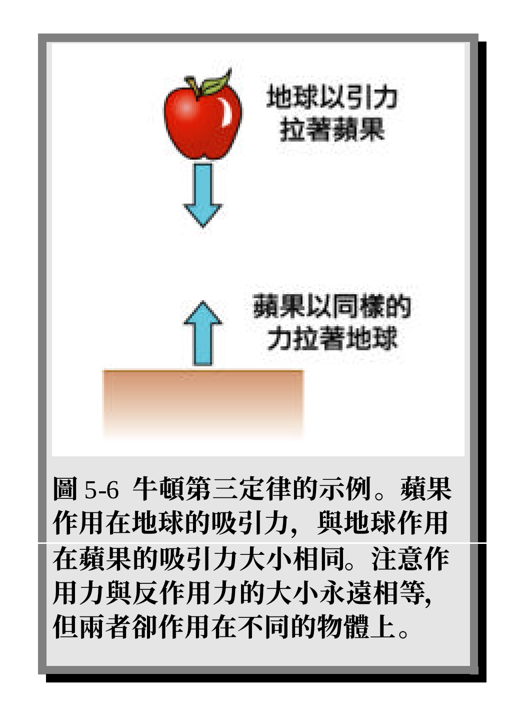


圖 5-6 牛頓第三定律的示例。蘋果作用在地球的吸引力，與地球作用在蘋果的吸引力大小相同。注意作用力與反作用力的大小永遠相等，但兩者卻作用在不同的物體上。

- **萬有引力定律 (Law of universal gravitation)**：兩個物體之間必然存在一吸引力，這引力 F 的大小與兩個物體質量 (M_1 和 M_2) 的乘積成正比，並與兩個物體的距離 r 的平方成反比 (圖 5-7)
  - 以數學公式表示：$F = -\frac{GM_1M_2}{r^2}$
  - 簡單來說，物體質量越大，引力就越強；物體分隔越遠，引力就越弱
  - 宇宙間任何物體，不論他們是蘋果、月球、或是太陽，都同樣地遵守這條定律
  - 兩物體之間的吸引力是相互的，換言之，M_1 作用在 M_2 的吸引力，與 M_2 作用在 M_1 的吸引力大小相等
  - 萬有引力比電力弱很多，但龐大的物體往往是電中性的 (由於正、負電荷互相吸引以至互相中和)，因此在天文學的尺度下，萬有引力支配星體的運動

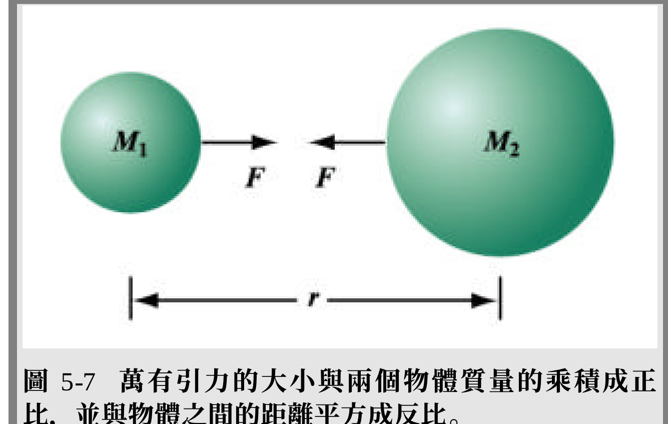


圖 5-7　萬有引力的大小與兩個物體質量的乘積成正比，並與物體之間的距離平方成反比。

- 運動定律 + 萬有引力定律
  - 萬有引力定律決定了天體之間的引力，而運動定律則告訴我們，在引力的作用下，天體將如何運動。因此我們可以預測任何天體在引力作用下的運動
  - 這代表宇宙萬物皆受力學支配，是機械式的宇宙觀 (mechanical universe)
  - 牛頓力學的宇宙觀是決定性的 (deterministic)，即理論上如果我們一個非常好的計算機，便可以非常準確地預測任何事物未來的命運。直至二十世紀，量子力學 (quantum mechanics) 和混沌 (chaos) 理論出現時，這個信念才被打破

5.4 牛頓力學的預測

- 解釋伽利略關於自由落體的發現：不同質量的物體以相同的加速度下跌
  - 假設物體 A 即比物體 B質量大。根據萬有引力定律，物體 A 比物體 B 受到較大的地球引力。但牛頓第二定律說，質量大的物體需要較大的力才可達至一定的加速度。故物體 A 雖然受較大的引力，它的加速度仍與物體 B相同 (圖 5-8)
  - 當升降機斷纜時，升降機與當中的人以同樣的加速度下跌，升降機不再承托著人，因此那人便感受不到自己的重量，經歷無重狀態

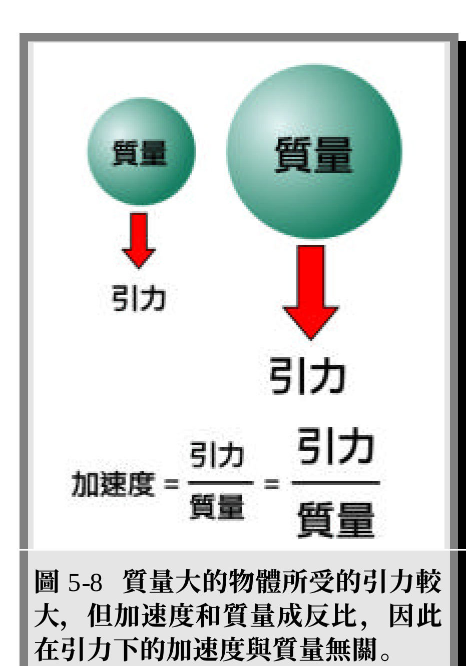


圖 5-8　質量大的物體所受的引力較大，但加速度和質量成反比，因此在引力下的加速度與質量無關。

  – 同樣，太空船與太空人在相同的軌道軌繞地球公轉，他們以同樣的加速度在地球引力下「自由下墜」，因此太空人也經歷無重狀態

- 解釋月球為何繞地球公轉
  – 如果月球沒有受到地球的引力，它便會根據牛頓第一定律沿直線運動 (圖 5-9 中的虛線)。但事實上它在地球的引力下不斷改變運動方向，形成繞地球公轉的軌道
  – 月球與墜落的蘋果一樣，不斷向著地球「下跌」，只是由於月球在軌道上以高速運動，因此永不墜落地面
  – 月球與蘋果，遵從同樣的物理定律

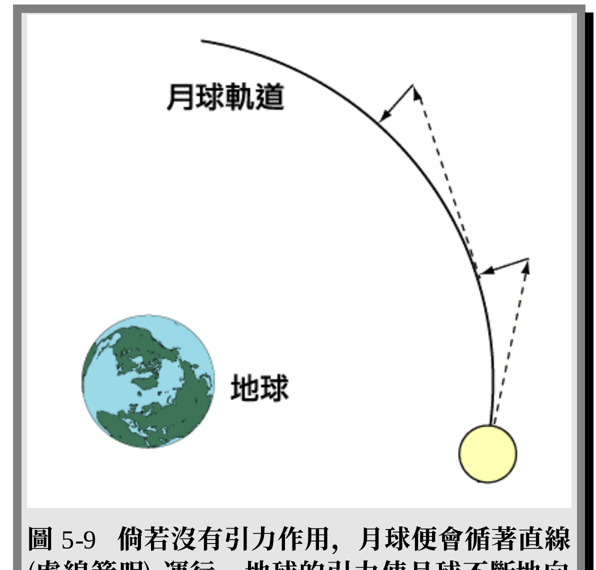


圖 5-9 倘若沒有引力作用，月球便會循著直線 (虛線箭咀) 運行。地球的引力使月球不斷地向地心加速，月球因而在弧形軌道上運行。

- 地 – 月球系統的運動
  – 地球與月球之間的引力是相互的：地球作用在月球的引力，與月球作用在地球的力大小相同。但是地球比月球質量大很多，因此根據牛頓第二律，地球的加速度和運動必然遠比月球小。結果是地球和月球繞著地 – 月球系統的質心 (center of mass) 旋轉 (圖 5-10)，質心位於地球之內。從外面看來，月球明顯地環繞地球轉動，而地球只是好像輕微地搖擺著

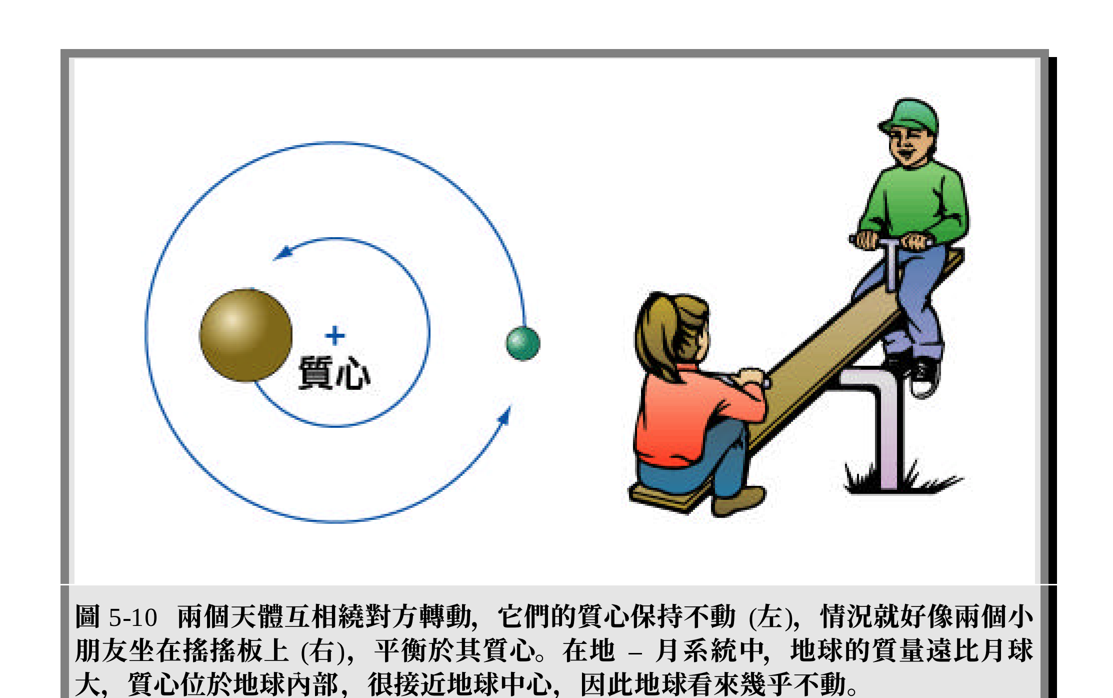


圖 5-10 兩個天體互相繞對方轉動，它們的質心保持不動 (左)，情況就好像兩個小朋友坐在搖搖板上 (右)，平衡於其質心。在地 – 月系統中，地球的質量遠比月球大，質心位於地球內部，很接近地球中心，因此地球看來幾乎不動。

- **投射物體的軌道**
  - **物體被投射時的初始速度** (initial velocity) **決定了它以後所走的軌道** (**圖** 5-11)
  - **如果初始速度太小，物體跌回地面**
  - **如果初始速度較大，但小於地球的逃逸速度 (escape velocity)，物體會在圓形或橢圓形軌道上環繞地球運行**
  - **如果初始速度等於或大於地球的逃逸速度，物體會循著拋物線** (parabola) **或雙曲線** (hyperbola) **軌道逃離地球，永不折返**
  - **不同的天體有不同的表面引力，因此有不同的逃逸速度。地球的逃逸速度為每秒** 11.2 **公里**

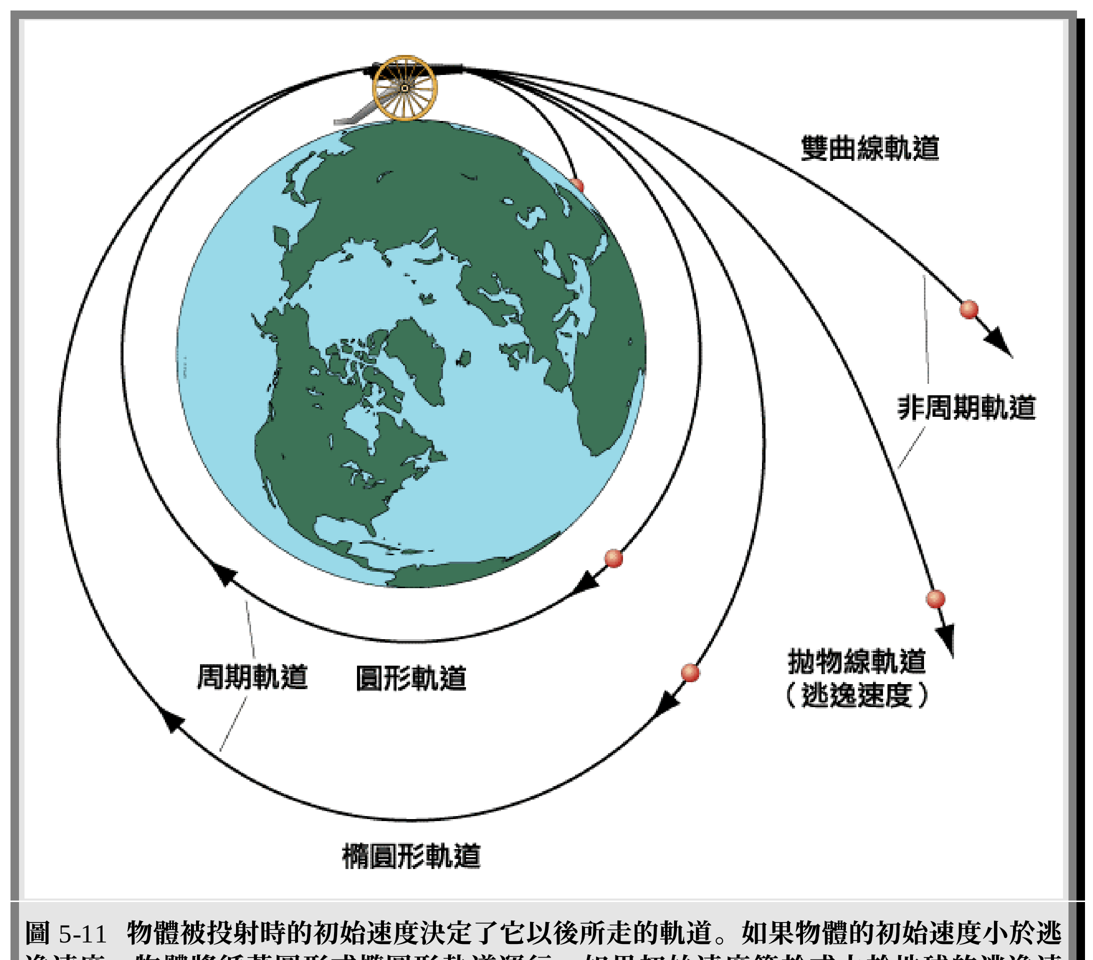


圖 5-11　**物體被投射時的初始速度決定了它以後所走的軌道。如果物體的初始速度小於逃逸速度，物體將循著圓形或橢圓形軌道運行。如果初始速度等於或大於地球的逃逸速度，物體將會循著拋物線或雙曲線軌道運行，永不折返。**

- **解釋開普勒行星的運動定律** (Kepler's laws of planetary motion)
  - **牛頓發明了微積分，加上運動定律和萬有引力定律，便能推導出行星繞太陽運動的方式。開普勒的行星運動定律，完全是牛頓力學的結果**

- **牛頓應用力學協助哈雷** (Edmund Halley) **計算一顆彗星** (**即後來的哈雷彗星**) **的軌道**
- **後人應用牛頓力學，計算行星與行星之間的引力，對它們運行軌道的影響。這種計算使行星位置的預測達到了前所未有的精確度**
  - **在** 19 **世紀，天文學家發現天王星的軌道與牛頓力學所計算的結果有差異，因此懷疑它受到一顆未知行星的引力影響，這促使天文學家在** 1845 **年發現海王星**
- **今天人類可以派太空船穿梭於太陽系眾行星之間，所依賴的仍然是牛頓力學**



圖 5-12　**伽利略以保衛哥白尼的理論而馳名於世。他本身也是一位天才橫溢的科學家，對物理學最大的貢獻是在研究自由落體的運動中發現了慣性定律。**

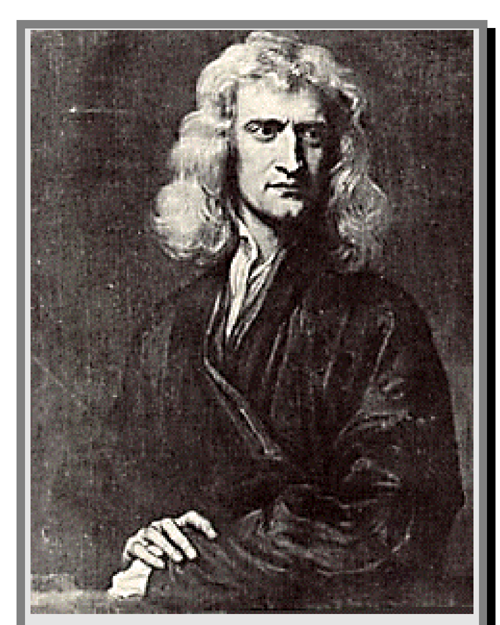


圖 5-13　**牛頓被譽為現代物理學的創始者。他建立了物體運動的三大定律和萬有引力定律，發現了一些光學原理，並發明了微積分。**

5.5 牛頓的性格

- *The Ascent of Man* by J. Bronowski
  - He was not exactly a homeless boy, and yet from that time he shows none of the intimacy that parents give. All his life he makes the impression of an unloved man. He never married. He never seems to have been able to flow out in that warmth which makes achievement a natural outcome of thought honed in the company of other people. On the contrary, Newton's achievements were solitary, and he always feared that others would steal them from him as (perhaps he thought) they had stolen his mother."
  - "When Newton was challenged on such questions as 'You have not explained why gravity acts' …he always answers in simple terms: 'I do not make hypothesis'. By which he meant, 'I do not deal in metaphysical speculation. I lay down a law, and derive the phenomena from it' ".
  - "Now if Newton had been a very plain, very dull, very matter of fact man, all that would be easily explicable. But I must make you see that he was not. He was really a

most extraordinary, wild character. He practiced alchemy. In secret, he wrote immense tomes about the Book of Revelation."… And for such a man, who in private was full of these wild metaphysical and mystical speculations, to hold this public face and say 'I make no hypothesis', that is an extraordinary expression of his secret character."

- "I do not know what I may appear to the world; but to myself I seem to have been only like a boy playing on the sea-shore, and diverting myself in now and then finding a smoother pebble or prettier shell than ordinary, while the great ocean of truth lay all undiscovered before me." —**Newton**